

Минералогия медных шлаков Екатеринбургского металлургического завода

Ю. В. Ерохин¹, О. С. Савченко², А. В. Захаров¹, В. С. Пономарев¹, Л. В. Леонова¹

¹Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург,
ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: erokhin-yu@yandex.ru

²Институт археологии и истории УрО РАН, 620108, г. Екатеринбург, ул. Ковалевской, 16,
e-mail: abakumova.olesya@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.08.2024 г., принята к печати 02.12.2024 г.

Объект исследования. Медные шлаки Екатеринбургского металлургического завода, основанного в 1723 г. и закрытого в 1808 г. **Материалы и методы.** Медные шлаки отобраны в археологическом раскопе на территории Исторического сквера г. Екатеринбурга. Вещественный состав шлаков изучался в лаборатории физико-химических методов исследования ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург). Химический состав минералов исследован и их фотографии сделаны с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA LMS, S6123 с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments. Рентгенофазовое изучение шлака проведено на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 фирмы Shimadzu. **Результаты.** Исследования показали, что представлены медные шлаки разных типов: пироксеновый, фаялит-вюститовый и пироксен-фаялитовый. Первый тип сложен однородным агрегатом авгита с присутствием стекла, магнезиохромита, меди и ковеллина. Второй тип представлен фаялитом и вюститом с присутствием стекла, меди и идаита, а также куприта, барита и атакамита. Третий тип шлака сложен геденбергитом и фаялитом с присутствием стекла, сульфидов, а также серебра, гипса и вторичных минералов меди (куприта, атакамита, самплеита, малахита и др.). **Выводы.** Такое разнообразие шлаков на небольшом участке раскопок подтверждает имеющиеся сведения о различных источниках медных руд для Екатеринбургского завода. При этом можно утверждать, что медные руды на завод поступали как окисленные, так и сульфидные. Последние происходили из Шиловского медного рудника и плавилась на Екатеринбургском заводе в первые годы работы предприятия. Из этих руд получились шлаки третьего типа – фаялит-геденбергитового состава. Окисленные руды, по всей видимости, происходили из Гумешевского рудника (фаялит-вюститовый шлак) и какого-то неизвестного мелкого рудника из района будущего крупного Пышминско-Ключевского месторождения (пироксеновый шлак). Для Екатеринбургского завода выявлена интересная технологическая тенденция: здесь сначала плавил колчеданы и только потом перешли к окисным медным рудам.

Ключевые слова: шлаки, минералогия, медь, фаялит, геденбергит, авгит, Екатеринбургский завод, Средний Урал

Источник финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства Свердловской области, № 24-27-20061, <https://rscf.ru/project/24-27-20061/>

Mineralogy of copper slags of Ekaterinburg Metallurgical Plant

Yuriy V. Erokhin¹, Olesya S. Savchenko², Anatoliy V. Zakharov¹, Vladimir S. Ponomarev¹,
Lyubov V. Leonova¹

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia,
e-mail: erokhin-yu@yandex.ru

²Institute of Archaeology and History, UB RAS, 16 Kovalevskaya st., Ekaterinburg 620108, Russia,
e-mail: abakumova.olesya@yandex.ru

Received 02.08.2024, accepted 02.12.2024

Research subject. Copper slags of Ekaterinburg Metallurgical Plant, founded in 1723 and discontinued in 1808. **Materials and methods.** Copper slags were collected from an archaeological excavation site in the Historical Square of Ekaterinburg.

Для цитирования: Ерохин Ю.В., Савченко О.С., Захаров А.В., Пономарев В.С., Леонова Л.В. (2025) Минералогия медных шлаков Екатеринбургского металлургического завода. *Литосфера*, 25(3), 674–687. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-674-687>. EDN: DGYMZU

For citation: Erokhin Yu.V., Savchenko O.S., Zakharov A.V., Ponomarev V.S., Leonova L.V. (2025) Mineralogy of copper slags of Ekaterinburg Metallurgical Plant. *Lithosphere (Russia)*, 25(3), 674–687. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-674-687>. EDN: DGYMZU

burg. The material composition of the slags was studied in the Laboratory of Physical and Chemical Research Methods of the Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg). The chemical composition of minerals and their photographs were taken using a TESCAN MIRA LMS, S6123 scanning electron microscope with an INCA Energy 450 X-Max 80 energy-dispersive attachment from Oxford Instruments. X-ray phase analysis of the slag was performed on an XRD-7000 X-ray diffractometer from Shimadzu. *Results.* The studies showed that copper slags are represented by different types – pyroxene, fayalite-wustite, and pyroxene-fayalite. The first type is composed of a homogeneous aggregate of augite with the presence of glass, magnesiochromite, copper, and covellite. The second type is represented by fayalite and wustite with the presence of glass, copper, and idaite, as well as cuprite, barite, and atacamite. The third type of slag is composed of hedenbergite and fayalite with the presence of glass, sulfides, as well as silver, gypsum, and secondary copper minerals (cuprite, atacamite, sampleyite, malachite, etc.). *Conclusions.* Such a variety of slags in a small excavation area confirms the available information about the various sources of copper ores for the Ekaterinburg plant. At the same time, it can be argued that both oxidized and sulfide copper ores were delivered to the plant. The latter came from the Shilovsky copper mine and were smelted at the Ekaterinburg plant in the first years of its operation. From these ores, slags of the third type were obtained, i.e., of fayalite-hedenbergite composition. Oxidized ores most likely originated from the Gumeshevsky mine (fayalite-wustite slag) and some unknown small mine from the area of the future large Pyshminsko-Klyuchevskoye deposit (pyroxene slag). An interesting technological trend at the Ekaterinburg plant was revealed: here, pyrites were first smelted and only then transition to oxide copper ores was made.

Keywords: *slags, mineralogy, copper, fayalite, hedenbergite, augite, Ekaterinburg plant, Middle Urals*

Funding information

The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation and the Government of the Sverdlovsk region, No. 24-27-20061, <https://rscf.ru/project/24-27-20061/>

ВВЕДЕНИЕ

Современный Екатеринбург ведет свое начало от типичных уральских городов-заводов, на которых вокруг плотины с металлургическим предприятием формировались жизнь и быт местного населения. Судьба оказалась благосклонна к Екатеринбургу, ведь если бы в 1702 г. Уктусский железоделательный завод (первый в нашей местности) сразу поставили на более полноводной р. Исети, то никакой закладки нового завода не состоялось. Да и сам город, возможно, носил бы название Уктус. Есть исторические сведения, что выбор места первого завода поручили сделать плотинному мастеру Каменского завода Ермоле Яковлеву, и все дело решило 5 рублей, которые собрали жители деревень вдоль р. Уктус (Кафенгауз, 1949). Повезло и с тем, что основатели Екатеринбурга В.Н. Татищев и В.И. де Геннин сразу решили, что новый завод должен быть крупнейшим (соответственно, и поселением) на Урале. В итоге в 20–40-е гг. XVIII в. Екатеринбургский завод стал самым крупным заводом во всей Европе (Гаврилов, 2000), что впоследствии позволило ему стать административным центром Уральского региона и четвертым городом России.

Екатеринбургский завод как металлургическое предприятие действовал в период 1723–1808 гг. (медеплавильное производство – с 1724 по 1769 гг.). За это достаточно продолжительное время рабо-

ты завод должен был накопить значительный шлакоотвал, который со временем, по всей видимости, использовался для нужд народного хозяйства (строительство дорог, домов и т.д.). На данный момент г. Екатеринбург находится в процессе постоянной застройки и для оценки возможности строительства в пределах исторического центра обязательно проводятся археологические изыскания. При таких работах, особенно в окрестностях бывшего завода, археологи часто встречаются с образцами металлургических шлаков, которые необходимо как-то идентифицировать и классифицировать. Именно с этой задачей мы совместно и пытаемся справиться. В настоящей работе мы приводим результаты изучения минералогии медных шлаков Екатеринбургского металлургического завода.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ЕКАТЕРИНБУРГСКОГО ЗАВОДА

Решение о строительстве Екатеринбургского завода было принято в январе 1721 г. В.Н. Татищевым, который убедился в маломощности и неперспективности ранее построенного казенного Уктусского завода. Место строительства выбрано в 8 верстах севернее на более полноводной реке Исети, поэтому первоначально завод именовался Исетским. В феврале 1721 г. В.Н. Татищев обратился в Берг-коллегию с предложением разре-

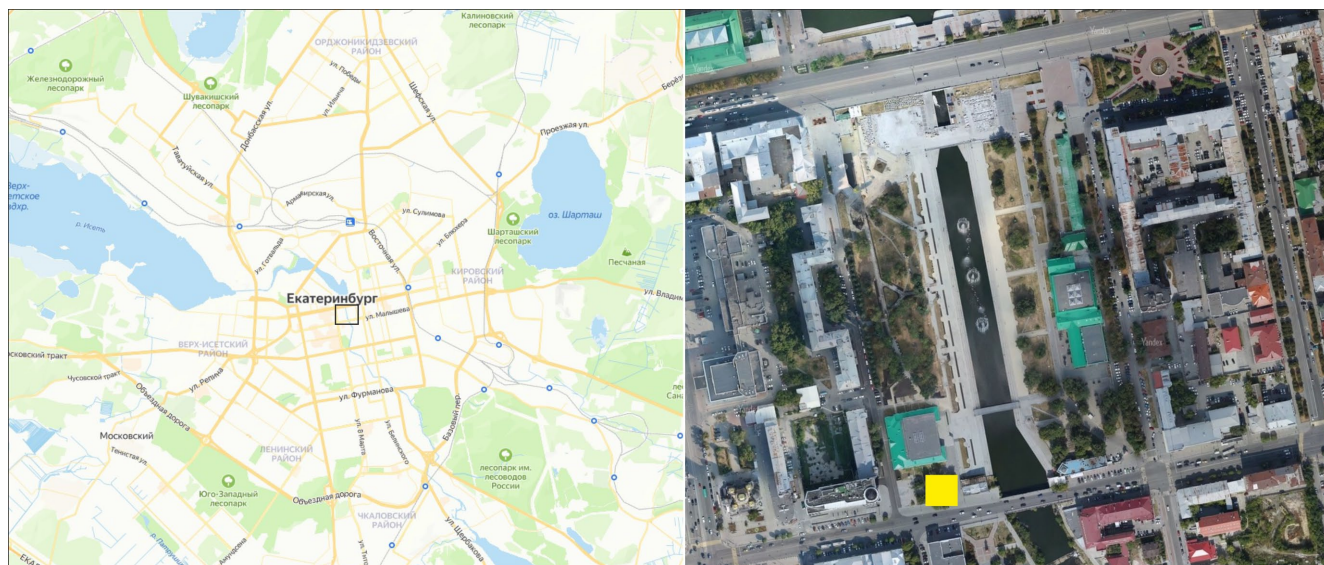


Рис. 1. Схема г. Екатеринбурга и Исторического сквера (с использованием сервиса Яндекс.Карты). Квадратом отмечено место археологических раскопок.

Fig. 1. Map of Ekaterinburg and Historical Square (given using the Yandex.Maps service). The square marks the site of archaeological excavations.

шить ему построить на р. Исети очень мощный завод с 4 доменными печами и 40 кричными молотами. Берг-коллегия не согласилась с предложениями В.Н. Татищева и в мае 1721 г. прислала ответ, в котором категорически приказывалось прекратить всякие работы по строительству нового завода, а уже в августе 1722 г. В.Н. Татищев был отстранен от дел и отозван в столицу (Металлургические заводы..., 2001).

Вновь назначенный Главным начальником Уральских заводов генерал-майор В.И. де Геннин одобрил начинания В.Н. Татищева, нашел выбранное им для строительства нового завода место “изрядным” и уже в декабре 1722 г. известил Берг-коллегию о своем решении возобновить строительство Исетского завода, который вскоре по его предложению был назван в честь жены Петра Великого Екатеринбургским заводом. К августу 1723 г. возвели плотину, которая, к слову, стоит до сих пор и по ней проходит главная улица города – проспект Ленина. В ноябре 1723 г. состоялось торжественное открытие Екатеринбургского завода, хотя запущена была только молотовая фабрика. Медная плавка началась только в январе 1724 г., а выплавка чугуна немного позднее – в августе этого же года (Металлургические заводы..., 2001).

В 1726 г. при заводе построен Монетный (“Платный”) двор для чеканки медных плат, а позднее – монет. К 1800 г. двор в год выпускал до 107 тыс. пудов медных денег – 9/10 всей российской монеты, а в период 1763–1800 гг. здесь начеканено бо-

лее 62 млн руб. медной монеты (Черноухов, 1974). В 1728 г. дополнительно построена меднопосудная фабрика. В 1737 г. случился крупный пожар на заводе и доменное производство чугуна было остановлено (чугун стал поступать с Верх-Исетского, а позднее с Каменского заводов). Постепенно росло экономическое и административное влияние самого города, а производительность завода снижалась. В 1769 г. медеплавильное производство было прекращено. Екатеринбургский завод продолжал выпускать полосовое железо и помогал обрабатывать медь для Монетного двора. В 1790-х гг. на несколько лет возобновилось медеплавильное производство, но очень быстро затухло. В 1800–1805 гг. на заводе возникла механическая мастерская, которая занималась изготовлением станков и агрегатов. В 1808 г. Екатеринбургский металлургический завод был полностью закрыт, а его производственные помещения и оборудование переданы Монетному двору (Металлургические заводы..., 2001).

МЕСТОНАХОЖДЕНИЕ И КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МЕДНЫХ ШЛАКОВ

Медные шлаки отобраны в пределах Исторического сквера г. Екатеринбурга на археологическом памятнике “Культурный слой г. Екатеринбурга XVIII – начала XX вв. в районе улиц Малышева–Воеводина” (рис. 1). Археологические работы проводились Институтом истории и археологии Уральского отделения РАН в целях определения

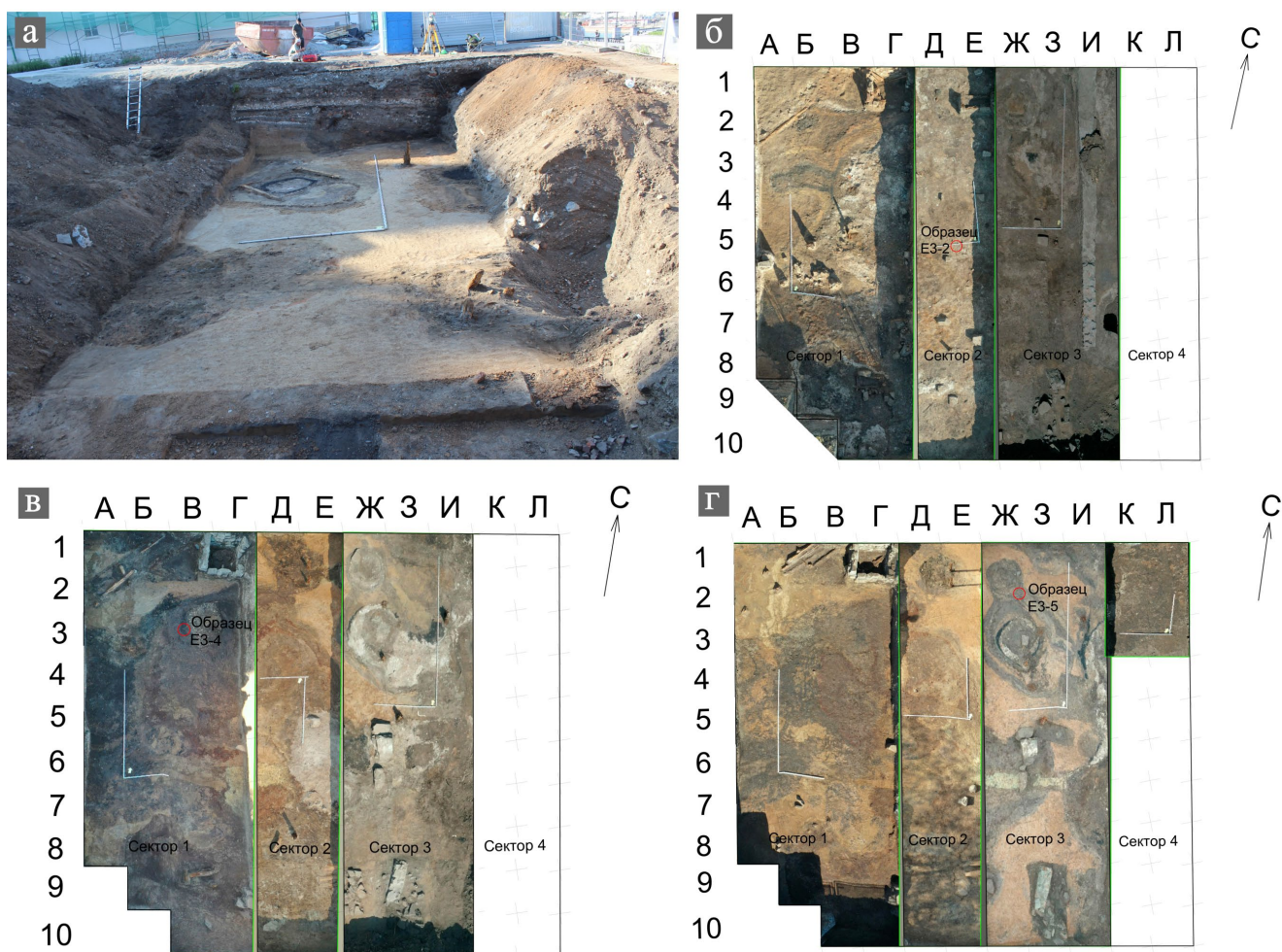


Рис. 2. Внешний вид археологического раскопа с местами отбора образцов медных шлаков. Фото О.С. Савченко.

а – фотография выработки (глубина 4 м, вид с юга), б – срез раскопа на глубине 2.6 м, в – срез раскопа на глубине 3.2 м, г – срез раскопа на глубине 3.4 м.

Fig. 2. External view of the archaeological excavation site with copper slag sampling sites. Photo by O.S. Savchenko.

а – photograph of the workings (depth 4 m, view from the south), б – section of the excavation at a depth of 2.6 m, в – section of the excavation at a depth of 3.2 m, г – section of the excavation at a depth of 3.4 m.

характеристик культурного слоя в пределах объекта строительства, а также сохранения информации о выявленном объекте культурного наследия в случае, когда невозможно обеспечить его физическую сохранность. Место археологического раскопа находится в 30 м южнее Музея изобразительных искусств, недалеко от моста через р. Исеть, возле пешеходного тротуара вдоль ул. Малышева. Площадь раскопа составила 435.71 м². Незатронутые культурные слои фиксируются на разных глубинах от дневной поверхности – от 3.2 м до 6 м, ниже идут речные отложения. Шлаки (медного и железодельного производства) обнаружены на всех секторах раскопа на глубине от 240 до 420 см от дневной поверхности (рис. 2).

Совместно с медеплавильными шлаками в раскопе обнаружены металлургические стекла, всплески меди и железа, а также шлаки железодельного производства (в большом количестве). Ниже приведено краткое описание отобранных нами медеплавильных шлаков (раскристаллизованных и нестекловидных) для более детального изучения:

Обр. ЕЗ-2 – тонкозернистый шлак на свежем сколе серого цвета с вкраплениями меди (сектор 2, уч. Д-Е/5, уровень 240–260 см, зафиксирован в переложном слое). Образцы размером до 10 см имеют стекловидную поверхность и зеленовато-желтоватую окраску.

Обр. ЕЗ-4 – тонкозернистый пористый шлак на свежем сколе черного цвета с вкраплениями меди

и куприта (сектор 1, уч. В/3, уровень 320 см, обнаружен в культурном слое). Образцы размером до 5 см с поверхности также черные, местами рыхлые и землистые за счет выветривания.

Обр. ЕЗ-5 – среднезернистый шлак на свежем сколе темно-серого цвета с вкраплениями сульфидов и присутствием вторичной минерализации меди (сектор 3, уч. Ж-И/1-3, уровень 320–340 см, отмечен в культурном слое). С поверхности образцы покрыты гладкой и плотной коркой, окрашенной в темно-красный, до коричневатого-красного, цвет. Это самые крупные образцы, их размер достигает 20 см.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Все аналитические исследования выполнены в Институте геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН в лаборатории физико-химических методов исследования (г. Екатеринбург). Для анализа использовались полированные петрографические шлифы, вырезанные из кусочков образцов.

Химический состав минералов исследован и фотографии в режиме BSE (обратно рассеянных электронов) сделаны с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA LMS, S6123 с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments и программным обеспечением AZtecOne с ускоряющим напряжением 20 кВ (аналитик Л.В. Леонова).

Рентгенофазовое изучение шлака проведено на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 фирмы Shimadzu с поликапиллярной оптикой и высокотемпературной приставкой НТК-1200N фирмы Anton Paar для работы в диапазоне температур 25–1500°C (аналитик О.Л. Галахова). Условия съемки: медное излучение, $V = 40$ кВ, $I = 30$ мА, размер шага – 0.02° .

РЕЗУЛЬТАТЫ

Обр. ЕЗ-2. Порода представлена однородным агрегатом пироксена с присутствием стекла и сферул (шариков) меди (рис. 3). Металл содержит редкие включения сульфида (ковеллина) и местами замещается купритом. Кроме того, в шлаке встречаются реликтовые зерна хромшпинелидов.

Пироксен образует скопления и агрегаты гипидиоморфных индивидов длиной до 50 мкм (см. рис. 3). По составу пироксен достаточно однородный и относится к авгиту (табл. 1). В интерстициях между зернами пироксена находится стекло (см. рис. 3г), которое имеет следующий химический состав (средн. из 6 ан.), мас. %: SiO_2 – 51.19, Al_2O_3 – 21.74, FeO – 8.35, CaO – 6.71, Na_2O – 2.92, K_2O – 8.43, P_2O_5 – 0.66. На диаграмме TAS для эффузивных пород данное стекло попадает в поле щелочных базальтоидов (теффрифонолитов). Высоко-

щелочное стекло в шлаке является результатом добавления в плавку своеобразного флюса, который использовали в те времена. Он состоял из двух частей винного камня (смесь $\text{K}_2\text{C}_4\text{H}_5\text{O}_6$ и $\text{K}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$) и одной части селитры (смесь нитратов калия, натрия и кальция). Этот флюс обычно добавляли при плавке окисных медных руд, а для плавки колчедана использовали другой флюс – так называемый “цыренный песок”, т. е. морскую соль (Геннин, 2022).

Зерна хромшпинелидов встречаются редко и обычно имеют оплавленные очертания (см. рис. 3в). Визуально они хорошо отмечаются на сером фоне шлака в виде черных вкраплений. Размер зерен не превышает 1 мм. В хромшпинелидах нет какой-либо зональности, они имеют следующий химический состав (средн. из 4 ан.), мас. %: SiO_2 – 0.53, Cr_2O_3 – 42.46, Al_2O_3 – 24.84, Fe_2O_3 – 2.41, FeO – 17.29, MgO – 12.71, сумма – 100.24, который пересчитывается на кристаллохимическую формулу Fe-Al магнезиохромита – $(\text{Mg}_{0.58}\text{Fe}_{0.42})_{1.00}(\text{Cr}_{1.02}\text{Al}_{0.89}\text{Fe}_{0.07}\text{Si}_{0.02})_{2.00}\text{O}_4$. Является реликтовым минералом.

Сферулы (шарики) меди обильно рассеяны по всей матрице шлака, их диаметр не превышает 1 мм (обычно меньше). По составу медь довольно чистая, в металле отмечаются Fe (обычно 0.4–0.9 мас. %, изредка до 1.3 мас. %), Ni (0.4–0.7 мас. %), Cr (0.2–0.7 мас. %) и Si (0–1.1 мас. %). Суммарно количество примесей не превышает 4 мас. %.

В шариках меди изредка отмечаются включения сульфида меди. Как правило, он образует корочки с поверхности, реже – включения в матрице металла. Размер выделений сульфида обычно не превышает 10 мкм. По химическому составу, мас. %: S – 33.01, Se – 0.80, Fe – 2.46, Cu – 62.73, сульфид хорошо пересчитывается на ковеллин (CuS).

Обр. ЕЗ-4. Порода представлена агрегатом фаялита и вюстита с присутствием стекла, а также сферул меди и сульфида Fe-Cu. Кроме того, в шлаке присутствует вторичная минерализация, представленная купритом, баритом и атакамитом.

Фаялит образует короткопризматические гипидиоморфные кристаллы длиной до 50 мкм (рис. 4а–в). Местами отмечаются скелетные кристаллы размером до 500 мкм. Часто обрастает и захватывает индивиды вюстита. По составу оливин предельно железистый (минал форстерита не превышает 7–10%, а кальциооливин – не более 1.5%) и относится к фаялиту. Из примесей в оливине отмечаются алюминий, магний и кальций (табл. 2). Присутствие фаялита в шлаке подтверждено рентгенофазовым анализом.

Вюстит является главным минералом шлака, его содержание достигает 60 об. %. Он образует изометричные гипидиоморфные индивиды диаметром до 20–50 мкм (см. рис. 4а–в). По составу оксид железа достаточно чистый, из примесей отмечаются Cr_2O_3 (до 1.8 мас. %), Al_2O_3 (до 1.4 мас. %), CoO (до 0.8 мас. %), SiO_2 (до 0.5 мас. %), TiO_2 (до

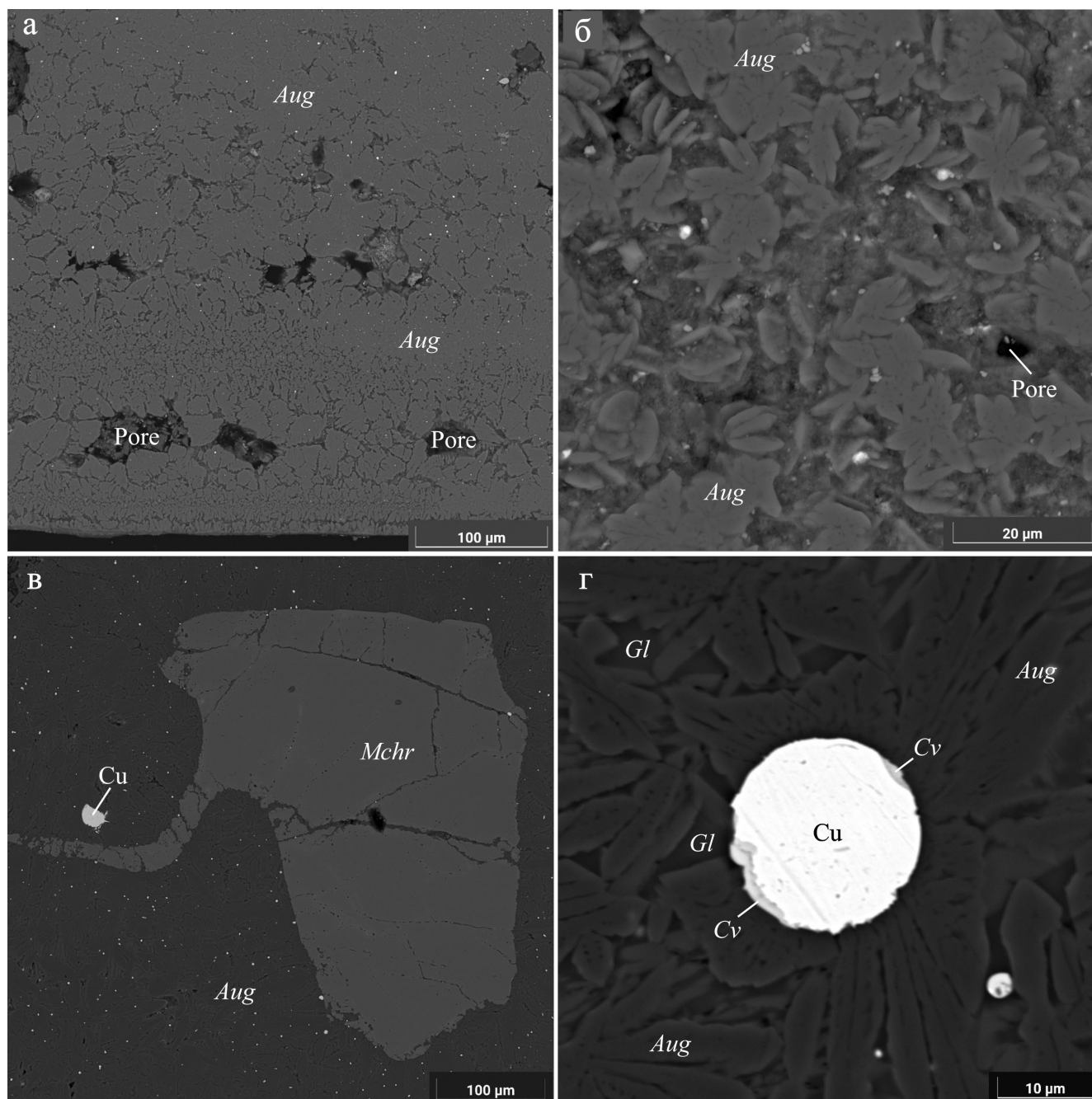


Рис. 3. Пироксеновый шлак (обр. ЕЗ-2). BSE-фото, СЭМ TESCAN MIRA LMS.

а – матрица шлака, б – агрегат пироксена (укрупненный фрагмент), в – зерно магнезиохромита, г – шарик меди с сульфидами; Aug – авгит, Mchr – магнезиохромит, Cv – ковеллин, Gl – стекло, Pore – поры.

Fig. 3. Pyroxene slag (sample YP-2). BSE photo, SEM TESCAN MIRA LMS.

а – slag matrix, б – pyroxene aggregate (enlarged fragment), в – magnesiochromite grain, г – copper ball with sulfides; Aug – augite, Mchr – magnesiochromite, Cv – covellite, Gl – glass, Pore – pores.

0.2 мас. %). Наличие вюстита в шлаке подтверждено рентгенофазовым анализом. Учитывая эвтектическую (одновременную) кристаллизацию вюстита и фаялита, можно утверждать, что данный шлак

образовался при температуре в пределах 1177°C (Bowen, Schairer, 1932; и др.).

В интерстициях между зернами вюстита и фаялита находится стекло, которое имеет следующую

Таблица 1. Представительные составы пироксена из обр. ЕЗ–2, мас. %**Table 1.** Representative compositions of pyroxene from sample ЕЗ–2, wt %

№ ан.	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	K ₂ O	Сумма
1	47.17	0.38	–	9.46	7.93	10.58	23.88	0.60	100
2	46.71	0.47	0.27	9.03	8.15	10.47	24.90	–	100
3	47.27	–	–	8.93	8.45	10.23	24.60	0.52	100
4	47.43	0.36	0.23	8.74	8.38	9.75	24.55	0.56	100
5	47.21	0.32	–	9.63	8.76	9.56	23.74	0.78	100
Кристаллохимические формулы									
1	$(\text{Ca}_{0.95}\text{K}_{0.03}\text{Fe}_{0.02})_{1.00}(\text{Mg}_{0.59}\text{Fe}_{0.23}\text{Al}_{0.18})_{1.00}[(\text{Si}_{1.76}\text{Al}_{0.23}\text{Ti}_{0.01})_{2.00}\text{O}_6]$								
2	$\text{Ca}_{1.00}(\text{Mg}_{0.58}\text{Fe}_{0.26}\text{Al}_{0.15}\text{Cr}_{0.01})_{1.00}[(\text{Si}_{1.75}\text{Al}_{0.24}\text{Ti}_{0.01})_{2.00}\text{O}_6]$								
3	$(\text{Ca}_{0.98}\text{K}_{0.03})_{1.01}(\text{Mg}_{0.57}\text{Fe}_{0.26}\text{Al}_{0.16})_{0.99}[(\text{Si}_{1.77}\text{Al}_{0.23})_{2.00}\text{O}_6]$								
4	$(\text{Ca}_{0.98}\text{K}_{0.03})_{1.01}(\text{Mg}_{0.54}\text{Fe}_{0.26}\text{Al}_{0.18}\text{Cr}_{0.01})_{0.99}[(\text{Si}_{1.78}\text{Al}_{0.21}\text{Ti}_{0.01})_{2.00}\text{O}_6]$								
5	$(\text{Ca}_{0.95}\text{K}_{0.04}\text{Fe}_{0.01})_{1.00}(\text{Mg}_{0.53}\text{Fe}_{0.26}\text{Al}_{0.21})_{1.00}[(\text{Si}_{1.77}\text{Al}_{0.22}\text{Ti}_{0.01})_{2.00}\text{O}_6]$								

щий химический состав (средн. из 5 ан.), мас. %: SiO₂ – 36.11, Al₂O₃ – 19.40, FeO – 23.05, CaO – 10.02, Na₂O – 4.58, K₂O – 4.31, P₂O₅ – 1.66, S – 0.87. На диаграмме TAS для эффузивных пород данное стекло попадает в поле щелочных пикритов.

В стекле отмечаются редкие включения сульфида меди и железа. Обычно они имеют округлые или ксеноморфные очертания. Размер выделений сульфида обычно не превышает 20 мкм. По химическому составу, мас. %: S – 34.11, Fe – 14.95, Cu – 50.94, сульфид хорошо пересчитывается на идаит (Cu₃FeS₄). По всей видимости, идаит является вторичным (гипергенным) минералом по первичному борниту.

Медные сферулы (шарики) обильно рассеяны по всей матрице шлака и имеют диаметр от 100 мкм до 1.5 см (см. рис. 4в). Часть меди полностью замещена купритом и местами с краев корродирована агрегатом куприта и атакамита. По составу медь довольно чистая, и из примесей в металле в основном отмечается Fe (в пределах 1.9–2.2 мас. %). Куприт, который замещает медь или образует собственные кристаллы в пустотах (см. рис. 4г), характеризуется близким содержанием FeO (в пределах 0.9–2.9 мас. %).

Обр. ЕЗ-5. Порода представлена агрегатом фаялита и геденбергита с присутствием стекла и сульфидов. Кроме того, в шлаке присутствует богатая вторичная минерализация меди (куприт, атакамит, самплеит, малахит, антлерит и девиллин), а также серебро и гипс.

Фаялит образует игольчатые скелетные кристаллы длиной до 1–2 см. Местами кристаллы оливина образуют структуру спинифекс (рис. 5). Включений не содержит, иногда захватывает стекло. По составу оливин предельно железистый (минимум кальциооливина не превышает 4.5%, а форсте-

рита – не более 3%) и относится к собственно фаялиту. Из примесей в оливине отмечаются только магний и кальций (табл. 3, ан. 1–4).

Пироксен образует скопления и агрегаты игольчатых и призматических индивидов длиной до 500 мкм (см. рис. 5). По химическому составу пироксен достаточно однородный и относится к кальциодефицитному геденбергиту (см. табл. 3, ан. 5–8), где часть позиции кальция замещается железом.

В интерстициях между зернами пироксена и оливина находится стекло, в котором, в свою очередь, отмечаются мелкие включения силикатов и сульфидов. Участки, наиболее очищенные от включений, имеют следующий химический состав (средн. из 3 ан.), мас. %: SiO₂ – 46.52, TiO₂ – 0.31, Al₂O₃ – 9.22, FeO – 28.08, CaO – 12.03, Na₂O – 0.43, K₂O – 1.13, P₂O₅ – 1.66, S – 0.62. На диаграмме TAS для эффузивных пород данное стекло попадает в поле основных пикробазальтов.

Металлическая медь в шлаке отсутствует, вместо нее отмечаются мелкие и крупные сферулы сульфидов меди и железа диаметром до 0.5 см (см. рис. 5а, в). Интересно, что они различаются по составу: мелкие более медистые, а крупные более железистые. Химический состав мелких шариков следующий, мас. %: S – 32.55–36.25, Fe – 0.81–5.22, Cu – 53.17–60.49, сульфид с максимальным содержанием меди и минимальным количеством серы близок к ковеллину (CuS). Химический состав крупных шариков резко отличается, мас. %: S – 42.75–46.72, Fe – 11.40–15.98, Cu – 36.94–46.70. Природных соединений с таким составом пока не обнаружено, а вот подобные “расплавные твердые растворы” системы Cu_{1-x}Fe_{2+y}S_{2-z} синтезированы в диапазоне температур от 1012 до 325°C (Kosyakov, Sinyakova, 2014). В виде включений в сульфи-

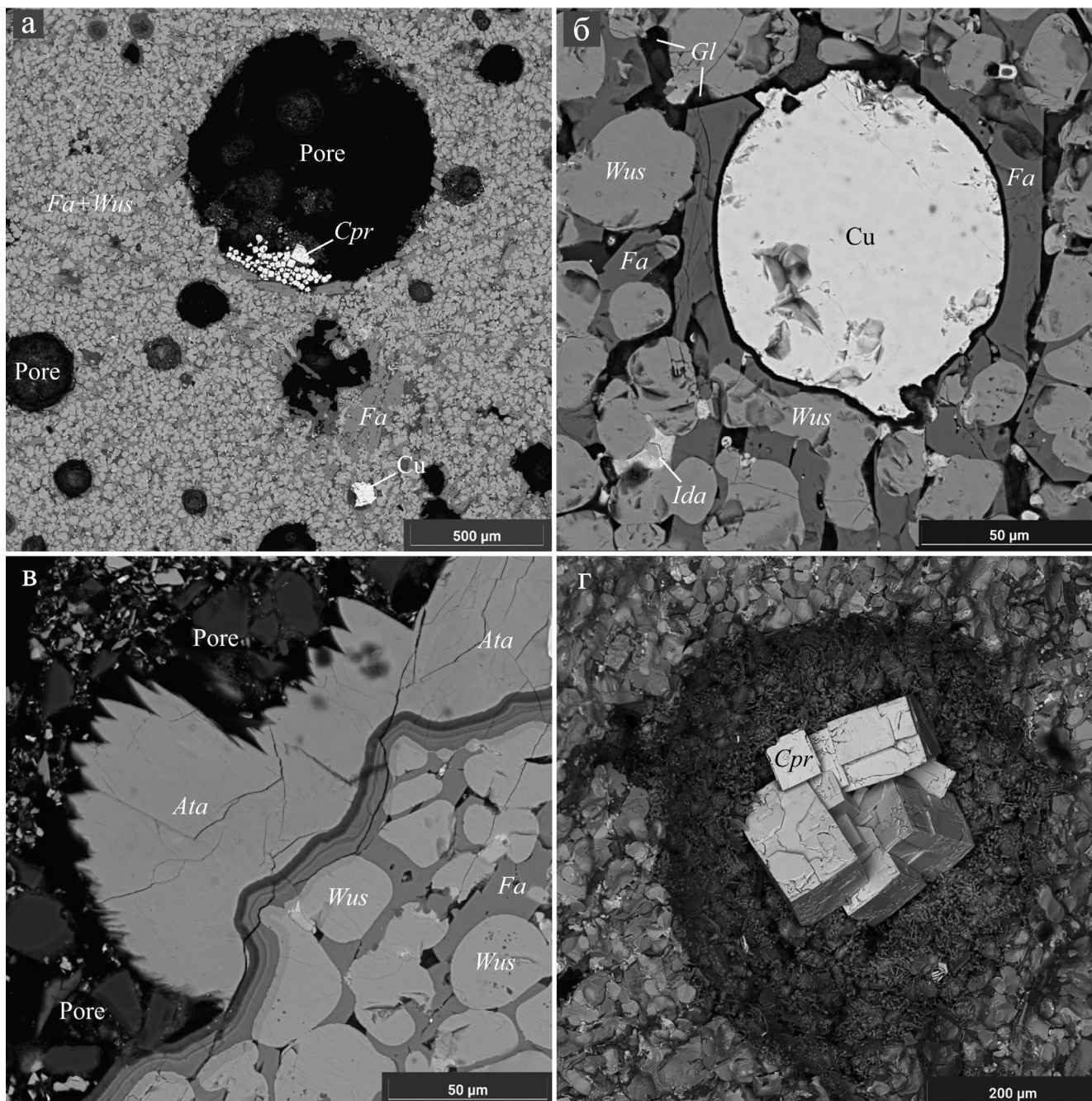


Рис. 4. Фаялит-вюститовый шлак (обр. ЕЗ-4). BSE-фото, СЭМ TESCAN MIRA LMS.

а – матрица шлака, б – медь в агрегате вюстита и фаялита, в – снопы атакамита в пустотах шлака, г – кристаллы куприта в полости шлака; *Wus* – вюстит, *Fa* – фаялит, *Ida* – идаит, *Gl* – стекло, *Cpr* – куприт, *Ata* – атакамит, *Pore* – поры.

Fig. 4. Wustite-fayalite slag (sample YP-4). BSE photo, SEM TESCAN MIRA LMS.

а – slag matrix, б – copper in the aggregate of wustite and fayalite, в – sheaves of atacamite in slag voids, г – cuprite crystals in the slag cavity; *Wus* – wustite, *Fa* – fayalite, *Ida* – idaitite, *Gl* – glass, *Cpr* – cuprite, *Ata* – atacamite, *Pore* – pores.

дах меди и железа встречаются округлые выделения галенита размером не более 5 мкм.

Вторичная минерализация меди в основном сосредоточена в пустотах, трещинах и на поверхно-

сти шлака. Обычно это зеленые, зеленоватые и голубоватые налеты или пленки, реже – небольшие сферолиты размером до 1 мм. Среди минералов надежно выделяются куприт, малахит, атакамит,

Таблица 2. Представительные составы фаялита из обр. ЕЗ–4, мас. %**Table 2.** Representative compositions of fayalite from sample E3–4, wt %

№ ан.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Сумма
1	29.06	0.49	67.63	2.00	0.82	100
2	29.47	0.66	67.25	1.84	0.78	100
3	29.40	0.52	67.63	1.74	0.71	100
4	29.36	0.60	67.75	1.41	0.88	100
5	29.07	0.39	68.32	1.39	0.83	100
Кристаллохимические формулы						
1	$(\text{Fe}_{1.88}\text{Mg}_{0.10}\text{Ca}_{0.03})_{2.01}[(\text{Si}_{0.97}\text{Al}_{0.02})_{0.99}\text{O}_4]$					
2	$(\text{Fe}_{1.87}\text{Mg}_{0.09}\text{Ca}_{0.03})_{1.99}[(\text{Si}_{0.98}\text{Al}_{0.03})_{1.01}\text{O}_4]$					
3	$(\text{Fe}_{1.88}\text{Mg}_{0.09}\text{Ca}_{0.03})_{2.00}[(\text{Si}_{0.98}\text{Al}_{0.02})_{1.00}\text{O}_4]$					
4	$(\text{Fe}_{1.90}\text{Mg}_{0.07}\text{Ca}_{0.03})_{2.00}[(\text{Si}_{0.98}\text{Al}_{0.02})_{1.00}\text{O}_4]$					
5	$(\text{Fe}_{1.91}\text{Mg}_{0.07}\text{Ca}_{0.03})_{2.01}[(\text{Si}_{0.97}\text{Al}_{0.02})_{0.99}\text{O}_4]$					

самплеит, антлерит и девиллин. Куприт (Cu₂O) образует налеты и мелкие кубики размером доли мм на ожелезненных поверхностях пустот шлака. Хорошо отличается своей типичной окраской в темно-красных тонах, содержит небольшую примесь FeO (до 3.4 мас. %). Малахит (Cu₂(CO₃)(OH)₂) образует пленки зеленого цвета мощностью до 50 мкм по поверхности сульфидных шариков или путем замещения выделений куприта. Карбонат активно реагирует с соляной кислотой, примесей не содержит. Атакамит (Cu₂(OH)₃Cl) инкрустирует полости шлака в виде изумрудно-зеленых щеток, расщепленных кристаллов и почковидных агрегатов размером до 0.5 мм (см. рис. 5г). Полностью соответствует теоретическому составу, из примесей отмечаются FeO (до 1.3 мас. %) и SiO₂ (до 0.5 мас. %). Самплеит (NaCaCu₅(PO₄)₄Cl×5H₂O) имеет голубую окраску и установлен как вторичный минерал, замещающий сульфидные скопления. Он образует корочки по поверхности шариков и прожилки, их рассекающие. Мощность прожилков не превышает 20–25 мкм. По составу постоянно содержит примеси FeO (до 2.8 мас. %) и K₂O (до 1.8 мас. %). При этом интересно, что корочки по поверхности сульфидных шариков слагает классический натровый самплеит, а вот в прожилках развита более калиевая (без натрия) разновидность. По всей видимости, в данном случае мы имеем дело с новым минералом – калиевым аналогом самплеита. Антлерит (Cu₃(SO₄)(OH)₄) образует зеленые корочки и округлые обособления в трещинах шлака. Размер выделений не более 20–30 мкм. По составу полностью соответствует теоретическому антлериту, из примесей отмечаются FeO (до 1.8 мас. %) и SiO₂ (до 1.1 мас. %). Девиллин (CaCu₄(SO₄)₂(OH)₆×3H₂O), самый

поздний минерал медной вторичной минерализации, выполняет центральную часть трещин (см. рис. 5г). Окраска голубая, мощность выделений не превышает 50 мкм. По составу полностью соответствует теоретическому девиллину, из примесей отмечаются FeO (до 1.0 мас. %) и SiO₂ (до 0.6 мас. %).

Серебро образует крайне редкие округлые включения размером до 5 мкм среди скоплений вторичных минералов меди. По составу чистое, никаких примесей не содержит. Интересно, что серебро в матрице шлака среди первичных минералов не установлено.

Гипс как вторичный минерал образует прозрачные призматические кристаллы размером до 1–2 мм в пустотах шлака. Судя по взаимоотношениям с другими минералами, сульфат кальция является самым поздним образованием в шлаке.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе проведенного изучения установлено, что медные шлаки представлены разными типами: пироксеновым, фаялит-вюститовым и пироксен-фаялитовым. Все это свидетельствует о том, что выплавка меди на Екатеринбургском заводе производилась из различных медных руд и разных рудников, расположенных недалеко от города.

В данном исследовании мы исходим из того, что все изученные нами шлаки образовались в результате первичной плавки медных руд. Дело в том, что по своему объему эти шлаки слагают основную часть отходов при плавлении руд и резко преобладают над другими типами металлургического передела (конвертацией, рафинированием и т. д.), т. е. они встречаются гораздо чаще. Кроме то-

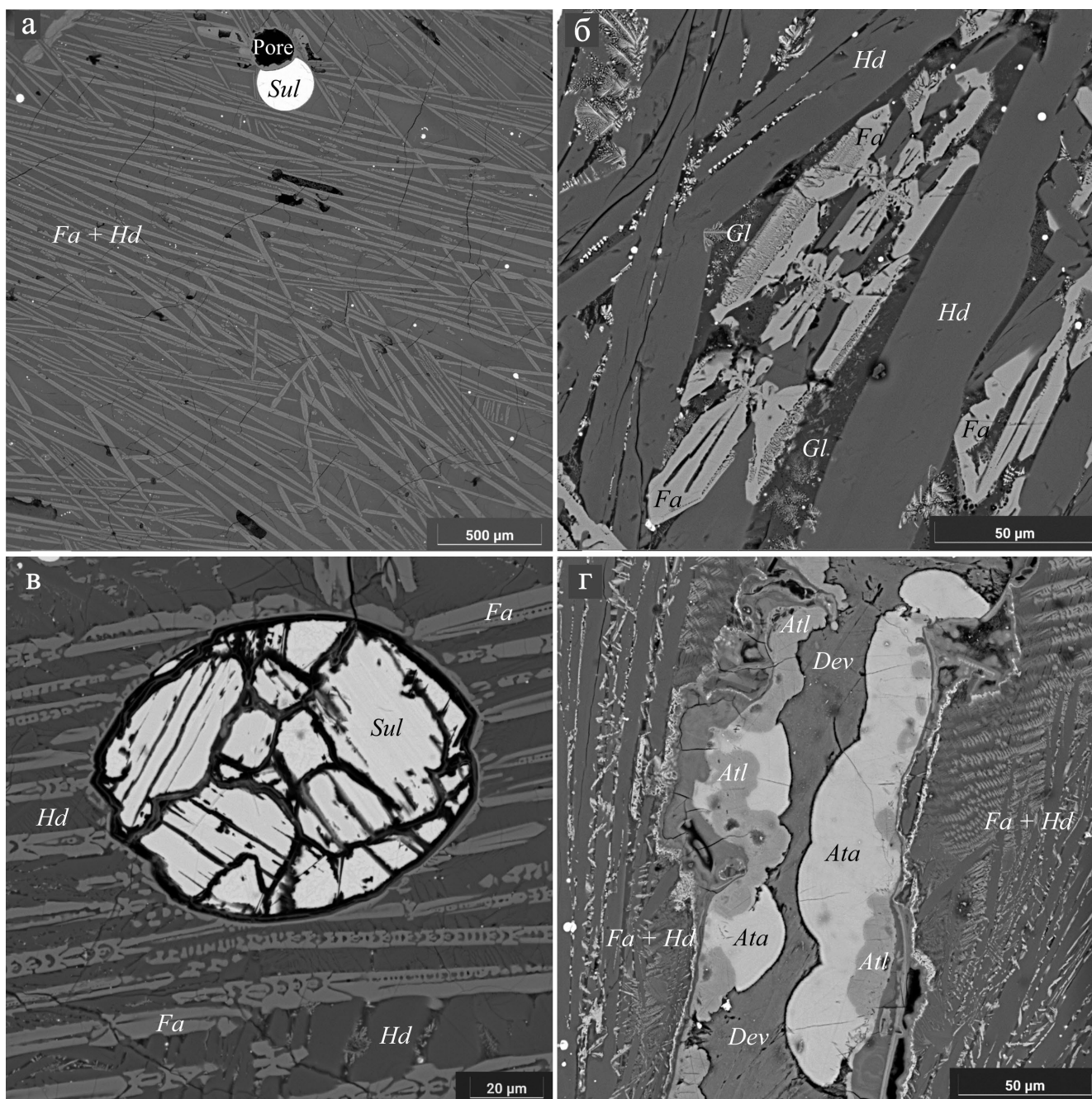


Рис. 5. Пироксен-фаялитовый шлак (обр. ЕЗ-5). BSE-фото, СЭМ TESCAN MIRA LMS.

а – матрица шлака, б – агрегат фаялита и геденбергита (укрупненный фрагмент), в – шарик сульфида меди, г – скопления вторичных минералов меди в трещине шлака; *Fa* – фаялит, *Hd* – геденбергит, *Sul* – сульфиды, *Gl* – стекло, *Ata* – атакамит, *Atl* – антлерит, *Dev* – девиллин, *Pore* – поры.

Fig. 5. Pyroxene-fayalite slag (sample YP-5). BSE photo, SEM TESCAN MIRA LMS.

а – slag matrix, б – fayalite and hedenbergite aggregate (enlarged fragment), в – copper sulfide ball, г – clusters of secondary copper minerals in a slag crack; *Fa* – fayalite, *Hd* – hedenbergite, *Sul* – sulfides, *Gl* – glass, *Ata* – atacamite, *Atl* – antlerite, *Dev* – devilline, *Pore* – pores.

го, данные шлаки выплавляются в больших объемах и, следовательно, более раскристаллизованы и пригодны для изучения.

Первый тип шлаков содержит вкрапления хромшпинелидов и примеси хрома в авгите, а также примеси хрома и никеля в металле. Это свиде-

Таблица 3. Представительные составы фаялита и геденбергита из обр. ЕЗ–5, мас. %**Table 3.** Representative compositions of fayalite and hedenbergite from sample E3–5, wt %

№ ан.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Сумма
Фаялит						
1	29.99	–	66.48	1.20	2.33	100
2	30.20	–	66.24	1.17	2.39	100
3	29.72	–	67.64	0.79	1.85	100
4	29.97	–	67.58	0.53	1.92	100
Геденбергит						
5	47.26	0.88	33.62	0.81	17.43	100
6	47.24	0.77	33.80	0.89	17.30	100
7	46.83	0.85	34.40	1.07	16.84	100
8	47.03	0.80	34.97	0.93	16.27	100
Кристаллохимические формулы						
1	$(\text{Fe}_{1.86}\text{Ca}_{0.08}\text{Mg}_{0.06})_{2.00}[\text{Si}_{1.00}\text{O}_4]$					
2	$(\text{Fe}_{1.85}\text{Ca}_{0.09}\text{Mg}_{0.06})_{2.00}[\text{Si}_{1.00}\text{O}_4]$					
3	$(\text{Fe}_{1.89}\text{Ca}_{0.07}\text{Mg}_{0.04})_{2.00}[\text{Si}_{1.00}\text{O}_4]$					
4	$(\text{Fe}_{1.90}\text{Ca}_{0.07}\text{Mg}_{0.03})_{2.00}[\text{Si}_{1.00}\text{O}_4]$					
5	$(\text{Ca}_{0.78}\text{Fe}_{0.22})_{1.00}(\text{Fe}_{0.95}\text{Mg}_{0.05})_{1.00}[(\text{Si}_{1.96}\text{Al}_{0.04})_{2.00}\text{O}_6]$					
6	$(\text{Ca}_{0.77}\text{Fe}_{0.23})_{1.00}(\text{Fe}_{0.94}\text{Mg}_{0.06})_{1.00}[(\text{Si}_{1.96}\text{Al}_{0.04})_{2.00}\text{O}_6]$					
7	$(\text{Ca}_{0.75}\text{Fe}_{0.25})_{1.00}(\text{Fe}_{0.94}\text{Mg}_{0.07})_{1.01}[(\text{Si}_{1.95}\text{Al}_{0.04})_{1.99}\text{O}_6]$					
8	$(\text{Ca}_{0.73}\text{Fe}_{0.27})_{1.00}(\text{Fe}_{0.94}\text{Mg}_{0.06})_{1.00}[(\text{Si}_{1.96}\text{Al}_{0.04})_{2.00}\text{O}_6]$					

тelleствует о том, что медные руды содержали значимую часть ультраосновного вещества и добывались либо в самих серпентинитах, либо в ассоциации с ними. При этом крайне низкое содержание сульфида в шлаке показывает, что медь выплавлялась из окисленных руд. Другими словами, источником подобных медных руд могли быть коры выветривания по офиолитовым телам, содержащим скопления медистых сульфидов. Таким критериям удовлетворяет район Пышминско-Ключевского медно-кобальтового (колчеданного) месторождения, которое залегает в субмеридиональной полосе вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород среднего и основного состава, граничащей на востоке с поясом небольших протяженных тел ультраосновных пород, трассирующих Верх-Исетский глубинный разлом (Мурзин и др., 2011). Пышминско-Ключевское месторождение расположено на северной окраине г. Екатеринбурга и по многим параметрам аналогично южноуральским медно-кобальтовым объектам: Ишкининскому, Дергамышскому, Ивановскому, Маукскому, которые также залегают в ультрамафитах (Мелекесцева, 2007). Само Пышминско-Ключевское место-

рождение открыто в 1854 г., и руды с этого объекта не могли проплавляться на Екатеринбургском заводе, который на тот момент уже был закрыт. В то же время в данном районе были и другие (мелкие) медные рудники: Балтымское, Благодатное, Шуваловское, Лебяжинское, Мостовское и мн. др. (Артемьев и др., 2022), открытые в разное время, в том числе и в царский период. При этом археологи и местные краеведы отмечают, что здесь и в XVIII в. были медные копи, к сожалению уже неизвестные или заложенные в коре выветривания вышеупомянутых рудников (Черных, 1970).

Второй тип медных шлаков является сильножелезистым, так как содержит до 60 об. % вюститa. Как и для первого типа шлаков, для данных шлаков характерно крайне низкое содержание сульфида, которое показывает, что медь выплавлялась из окисленных руд. По всей видимости, в качестве медной руды в данном случае использовался бурый железняк (лимонит), который имеет обильную “пропитку” минералами меди (самородной медью, малахитом, азуритом, хризоколлой и др.). Подобные руды добывались в зоне окисления на Гумешевском (Вертушков, 1975; Иванов, 1941) и Мед-

норудянском (Попова и др., 2015) месторождениях. Последний объект открыт только в 1814 г., т.е. почти сразу после закрытия Екатеринбургского завода. Гумешевский рудник расположен в 40 км южнее г. Екатеринбурга (в центре современного г. Полевского). Он открыт в 1702 г., а отрабатываться стал в 1709 г., руда сначала поступала на Уктусский завод, а с 1724 г. – на Екатеринбургский и Полевской заводы.

Третий тип изученных шлаков радикально отличается от первых двух типов, так как в качестве сырья здесь использовались не окисленные руды, а сульфидные (медно-колчеданные). По своему минеральному составу (с преобладанием фаялита, геденбергита и сульфидов) он напоминает шлаки позднего царского времени (Ерохин и др., 2023). Было несколько удивительно встретить именно такие сульфидизированные шлаки на Екатеринбургском заводе. Дело в том, что окисленные руды на тот момент чаще встречались в окрестностях Екатеринбургского завода, их было легче добывать (они находятся на поверхности и более рыхлые по консистенции), и по содержанию металла они всегда более богатые. При этом генерал-майор В.И. де Геннин явно предпочитал выплавку меди именно из сульфидной руды, такая выплавка тогда считалась передовой европейской технологией. Это особо отмечается в его письме к своему рудознанию И.К. Патрушеву накануне открытия Екатеринбургского завода: “Вели как возможно спешить, чтоб хотя бы одна медная плавильная печь в Екатеринбурге в ходу была, и вели начинать плавить токмо с колчеданом. И на Уктусе вели також плавить, чтоб добрый роштейн родился...” (Корепанов, 2001). При этом он еще в июне 1723 г. приказал форсировать добычу на трех медных рудниках, по всей видимости, имея в виду Гумешевский, Шиловский и Полевской медные рудники, о которых сам упоминал при описании медеплавильного дела на Уктусском заводе (Геннин, 2022). Интересно, что добывали медный колчедан на тот момент только на Шиловском медном руднике, который был открыт в 15 км западнее Уктусских гор в 1703 г. арамилем Иваном Шиловым (Данилевский, 1949), и добываемые там руды с 1713 г. плавилась на Уктусском заводе (Байдин и др., 2011). В геологическом плане рудник представляет собой скарновое месторождение с медно-сульфидной и магнетитовой минерализацией (Огородников и др., 2001). По всей видимости, сначала на Уктусском заводе плавил окисные руды, и только в декабре 1722 г. в присутствии генерала В.И. де Геннина была проведена первая на Урале опытная плавка сульфидных руд (Корепанов, 2012). Таким образом, на Екатеринбургском заводе с самого основания предприятия плавил медно-сульфидные руды, и описанный нами третий тип шлака тому доказательство.

Если рассматривать глубины отбора в археологическом раскопе изученных нами медных шлаков, то очевидно, что самый ранний (древний) шлак – это фаялит-геденбергитовый шлак, он поднят с глубины 320–340 см. По всей видимости, данный шлак выплавлен из сульфидной руды Шиловского рудника, а время выплавки – первые годы работы Екатеринбургского завода (учитывая, что Шиловский рудник был остановлен в 1724 г. и снова заработал только в 1732 г., а в 1733 г. генерал В.И. де Геннин ушел в отставку). Очевидно, что после отставки В.И. де Геннина на Екатеринбургском заводе практически сразу стали плавить более дешевую и доступную окисную медную руду, которая в изобилии поступала в основном с богатого Гумешевского рудника (Полевской рудник очень быстро истощился). Об этом говорит вюстит-фаялитовый шлак, поднятый с глубины 320 см (это примерно первые годы после 1733 г.). Самый молодой – пироксеновый шлак, поднятый с глубины 240–260 см, тоже выплавлен из окисной медной руды. Вполне вероятно, что данная руда добыта в одном из многочисленных мелких рудников в районе будущего крупного Пышминско-Ключевского месторождения. Время выплавки шлака – 60-е гг. XVIII в., когда медеплавильное производство на Екатеринбургском заводе было прекращено, или, возможно, 1790-е гг., когда на несколько лет возобновилось производство меди. Более конкретно сказать невозможно, так как данный шлак зафиксирован в потревоженном (возможно, переотложенном) слое.

Полученные нами данные достаточно хорошо коррелируют с археологическими находками. Коллекция археологического материала, полученная в ходе раскопок, насчитывает 2510 экземпляров. Большая часть поднятого материала датируется в пределах середины XVIII – начала XX вв. В ходе исследования участка, где находились медные шлаки, обнаружены монеты второй половины XVIII в.: монеты неизвестного номинала 1726, 1748, 1773, 1783 гг., полushка 1796 г., 2 копейки 1798 г., обнаруженные на глубинах от 230 до 410 см от дневной поверхности.

Косвенным доказательством отнесения медных шлаков с глубин 320–340 см к раннему периоду становления Екатеринбургского завода может служить их совместное залегание со шлаками железоделательного производства. Как следует из исторических сведений (Металлургические заводы..., 2001), с 1737 г. в связи с пожаром доменное производство железа на заводе было полностью остановлено.

ВЫВОДЫ

Нами впервые изучена минералогия медных шлаков Екатеринбургского железоделательного завода, действовавшего в период с 1723 по 1808 г. Установлено, что медные шлаки представлены раз-

ными типами: пироксеновым, вюстит-фаялитовым и пироксен-фаялитовым. Первый тип сложен однородным агрегатом авгита с присутствием стекла, магнезиохромита, меди и ковеллина. Второй тип представлен фаялитом и вюститом с присутствием стекла, меди и идаита, а также куприта, барита и атакамита. Третий тип шлака сложен геденберgitом и фаялитом с присутствием стекла, сульфидов, а также серебра, гипса и вторичных минералов меди (куприта, атакамита, самплеита, малахита и др.). Такое разнообразие шлаков на небольшом участке раскопок подтверждает имеющиеся исторические данные о различных источниках медных руд для Екатеринбургского завода. При этом можно утверждать, что на завод поступали как окисленные, так и сульфидные медные руды. Последние происходили из Шиловского медного рудника и плавилась на Екатеринбургском заводе в первые годы работы предприятия. Из этих руд получились шлаки третьего типа – фаялит-геденберgitового состава. Окисленные руды, по всей видимости, происходили из Гумешевского рудника (фаялит-вюститовый шлак) и какого-то неизвестного мелкого рудника из района будущего крупного Пышминско-Ключевского месторождения (пироксеновый шлак). Для Екатеринбургского завода выявлена интересная технологическая тенденция: здесь сначала плавил медный колчедан и только потом перешли к окисным медным рудам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артемов Д.А., Степанов И.С., Анкушева П.С. (2022) Ресурсно-сырьевая база иткульской металлургии раннего железного века Среднего Зауралья. *Урал. историч. вестн.*, (4), 55–68.
- Байдин В.И., Грачев В.Ю., Коновалов Ю.В., Мосин А.Г. (2011) Уктус, Уктусский завод и его окрестности в XVII–XVIII вв. Екатеринбург: Грачев и партнеры, 68 с.
- Вертушков Г.Н. (1975) Гумешевское месторождение малахита на Урале. *Тр. Свердл. горн. ин-та*, **106**, 3–26.
- Гаврилов Д.В. (2000) Екатеринбургский металлургический завод – самый крупный завод Европы 20–40-х гг. XVIII в. *Третьи Татищевские чтения*. Тез. докл. и сообщ. Екатеринбург: Банк культурн. информации, 27–33.
- Геннин В.И. (2022) Описание уральских и сибирских заводов. Екатеринбург: Грачев и Партнеры, 491 с.
- Данилевский В.В. (1949) Русская техника. Л.: Ленинград. газетн.-журн. и книжн. издательство, 348 с.
- Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Захаров А.В., Леонова Л.В. (2023) Минералогия медных шлаков Сысертского железоделательного завода, Средний Урал. *Минералогия*, **9**(2), 30–40.
- Иванов С.Н. (1941) Гумешевское медное месторождение на Урале. *Сов. геология*, (2), 82–96.
- Кафенгауз Б.Б. (1949) История хозяйства Демидовых в XVIII–XIX вв. (опыт исследования по истории уральской металлургии). М.; Л.: Изд-во АН СССР, 524 с.
- Корепапов Н.С. (2001) В раннем Екатеринбурге (1723–1781 гг.). Екатеринбург: Банк культурн. информации, 251 с.
- Корепапов Н.С. (2012) Уктус – исток Екатеринбурга. Екатеринбург: Грачев и партнеры, 40 с.
- Мелекесцева И.Ю. (2007) Гетерогенные кобальт-медно-колчеданные месторождения в ультрамафитах палеоостроводужных структур. М.: Наука, 245 с.
- Металлургические заводы Урала XVII–XX вв. Энциклопедия. (2001) (Гл. ред. В.В. Алексеев). Екатеринбург: Академкнига, 536 с.
- Мурзин В.В., Варламов Д.А., Викентьев И.В. (2011) Медно-кобальтовое оруденение Пышминско-Ключевского месторождения на Среднем Урале: минеральный состав руд и метасоматитов, стадийность, РТ-условия минералообразования. *Литосфера*, (6), 103–122.
- Огородников В.Н., Сазонов В.Н., Поленов Ю.А. (2001) Геологические маршруты по Екатеринбургью (коренные вопросы геологии и полезных ископаемых). Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 227 с.
- Попова В.И., Попов В.А., Блинов И.А., Пономарев В.С. (2015) Минералы Меднорудянского месторождения (Средний Урал). *Минералог. альманах*, **20**(3), 128.
- Черноухов А.В. (1974) Обзор фонда Екатеринбургского монетного двора. *Вспомогательные исторические дисциплины*. Свердловск: УрГУ, 41–50.
- Черных Е.Н. (1970) Древнейшая металлургия Урала и Поволжья. М.: Наука, 180 с.
- Bowen N.L., Schairer J.F. (1932) The system FeO–SiO₂. *Amer. J. Sci.*, **24**, 117–213.
- Kosyakov V.I., Sinyakova E.F. (2014) Melt crystallization of CuFe₂S₃ in the Cu-Fe-S system. *J. Therm. Analys. Calorimetry*, **115**, 511–516.

REFERENCES

- Artem'ev D.A., Stepanov I.S., Ankusheva P.S. (2022) Resource and raw material base of the Itkul metallurgy of the early Iron Age of the Middle Trans-Urals. *Ural. Istoricheskii Zhurnal*, (4), 55–68. (In Russ.)
- Baidin V.I., Grachev V.Yu., Kononov Yu.V., Mosin A.G. (2011) Uktus, Uktus plant and its surroundings in the 17–18th centuries. *Ekaterinburg, Grachev i Partnery Publ.*, 68 p. (In Russ.)
- Bowen N.L., Schairer J.F. (1932) The system FeO–SiO₂. *Amer. J. Sci.*, **24**, 117–213.
- Chernoukhov A.V. (1974) Review of the Ekaterinburg Mint Collection. *Auxiliary Historical Disciplines*. Sverdlovsk, UrGU Publ., 41–50. (In Russ.)
- Chernykh E.N. (1970) The most ancient metallurgy of the Urals and Volga region. Moscow, Nauka Publ., 180 p. (In Russ.)
- Danilevskii V.V. (1949) Russian technology. Leningrad, Leningradskoe gazetno-zhurn. i knizhnoe izd-vo Publ., 348 p. (In Russ.)
- Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S., Zakharov A.V., Leonova L.V. (2023) Mineralogy of copper slags of the Sysert ironworks, Middle Urals. *Mineralogy*, **9**(2), 30–40. (In Russ.)
- Gavrilov D.V. (2000) Ekaterinburg Metallurgical Plant – the Largest Plant in Europe in the 1720s–1740s. *3rd Tatischev Readings*. Abstracts of Reports and Communications. Ekaterinburg, Bank Kul'turnoi Informatsii Publ.,

- 27-33. (In Russ.)
- Gennin V.I. (2022) Description of the Ural and Siberian plants. Ekaterinburg, Grachev i Partnery Publ., 491 p. (In Russ.)
- Ivanov S.N. (1941) Gumeshevskoe copper deposit in the Urals. *Sov. Geol.*, (2), 82-96. (In Russ.)
- Kafengauz B.B. (1949) History of the Demidov household in the 18th–19th centuries. (research experience on the history of Ural metallurgy). Moscow; Leningrad, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 524 p. (In Russ.)
- Korepanov N.S. (2001) In early Ekaterinburg. (1723–1781) Ekaterinburg, Bank Kul'turnoi Informatsii Publ., 251 p. (In Russ.)
- Korepanov N.S. (2012) Uktus – the source of Ekaterinburg. Ekaterinburg, Grachev i Partnery Publ., 40 p. (In Russ.)
- Kosyakov V.I., Sinyakova E.F. (2014) Melt crystallization of CuFe_2S_3 in the Cu-Fe-S system. *J. Therm. Analys. Calorimetry*, **115**, 511-516.
- Melekestseva I.Yu. (2007) Heterogeneous cobalt-copper pyrite deposits in ultramafites of paleoisland-arc structures. Moscow, Nauka Publ., 245 p. (In Russ.)
- Metallurgical plants of the Urals in the 17–20th centuries. Encyclopedia. (2001) (Chief ed. V.V. Alekseev). Ekaterinburg, Akademkniga Publ., 536 p. (In Russ.)
- Murzin V.V., Varlamov D.A., Vikent'ev I.V. (2011) Copper-cobalt mineralization of the Pyshminsko-Klyuchevskoye deposit in the Middle Urals: mineral composition of ores and metasomatites, staging, P-T conditions of mineral formation. *Lithosphere*, (6), 103-122. (In Russ.)
- Ogorodnikov V.N., Sazonov V.N., Polenov Yu.A. (2001) Geological routes in Yekaterinburg (fundamental issues of geology and minerals). Ekaterinburg, UGGGA Publ., 227 p. (In Russ.)
- Popova V.I., Popov V.A., Blinov I.A., Ponomarev V.S. (2015) Minerals of the Mednorudnyanskoye deposit (Middle Urals). *Mineralog. Al'manakh*, **20**(3), 128 p. (In Russ.)
- Vertushkov G.N. (1975) Gumeshevskoe malachite deposit in the Urals. *Tr. Sverdlovsk. Gornogo Instituta*, **106**, 3-26. (In Russ.)